DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS A MONTANTE E REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DE CASSITERITA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA AMBIENTAL

DECOMMISSIONING OF UPSTREAM DAMS AND REUSE OF CASSITERITE TAILINGS: A SYSTEMATIC REVIEW OF SUSTAINABILITY AND ENVIRONMENTAL SAFETY

Gisele Rodrigues Pimenta [1]; Vanessa Malta Barbosa [2]; Lucas Guastovara David [3]; Aparecida Amaral de Souza [4]; Thaís Kauane Kemp [5]; Valéria Costa de Oliveira [6]; Melissa Cíndel Alves da Silva [7].

[1]Graduanda em Engenharia Civil | giselerpimenta15@gmail.com | IFRO | Porto Velho, Brasil; [2]Graduanda em Engenharia Civil | vanessa.maltabarbosa@gmail.com | IFRO | Porto Velho, Brasil; [3]Graduando em Engenharia Civil | lucasgm2774@gmail.com | IFRO | Porto Velho, Brasil; [4]Graduanda em Engenharia Civil | amarau.cyda@gmail.com | IFRO | Porto Velho, Brasil; [5]Graduanda em Engenharia Civil | thaiskemp022@gmail.com | IFRO | Porto Velho, Brasil; [6]Doutora em Engenharia Civil | valeria.oliveira@ifro.edu.br | IFRO | Porto Velho, Brasil; [7]Especialista em Avaliações e Perícias de Engenharia | eng.melissacindel@outlook.com | IFRO | Porto Velho, Brasil.

Resumo:
Os impactos negativos do setor de mineração no Brasil têm motivado a mudança das legislações e a exploração de alternativas sustentáveis. Este estudo tem como objetivo avaliar os métodos de descaracterização, apresentar possíveis reaproveitamentos dos rejeitos de cassiterita e avaliar criticamente a sustentabilidade da abordagem, integrando as dimensões de desempenho técnico e segurança ambiental. Na metodologia realizou-se uma pesquisa bibliográfica sistemática, conduzida de forma rigorosa, com o objetivo de identificar, analisar e sintetizar os principais estudos já publicados sobre o tema. Verificou-se que o reaproveitamento dos rejeitos como substituto parcial do agregado miúdo trouxe resultados significativos quando utilizado em elementos de matrizes cimentícias. Além de que estudos indicam que as espécies nativas da Indonésia possuem uma notável capacidade de revegetação em áreas de barragens de rejeito de estanho. Os rejeitos da mineração, quando reaproveitados na engenharia civil, representam uma oportunidade estratégica que favorece a sustentabilidade, a economia circular e o desenvolvimento de soluções inovadoras, especialmente em regiões mineradoras.

Palavras-chave:
Descaracterização; Barragem a montante; Rejeito de cassiterita; Reaproveitamento; Recuperação ambiental.

Abstract:
The negative impacts of the mining sector in Brazil have motivated changes in legislation and the exploration of sustainable alternatives. This study aims to evaluate decommissioning methods, present possible reuses for cassiterite tailings and critically assess the sustainability of the approach, integrating the dimensions of technical performance and environmental safety. In the methodology, a systematic literature review was conducted rigorously, with the objective of identifying, analyzing, and synthesizing the main studies already published on the topic. It was found that the reuse of tailings as a partial substitute for fine aggregate brought significant results when used in cementitious matrix elements. Furthermore, studies indicate that native Indonesian species have a remarkable capacity for revegetation in tin tailing dam areas. Mining tailings, when reused in civil engineering, represent a strategic opportunity that promotes sustainability, the circular economy, and the development of innovative solutions, especially in mining regions.

Keywords:
Decommissioning; Upstream dam; Cassiterite tailings; Repurposing; Environmental recovery.

1. INTRODUÇÃO

Os eventos catastróficos ocorridos no Brasil no período de 2015 e 2019 envolvendo barragens de rejeitos de minério, resultaram em mudanças no âmbito legislativo. A Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, da Agência Nacional de Mineração (ANM), trouxe como medida regulatória a proibição da utilização de barragens de mineração com o método construtivo de alteamento "a montante" em todo o território brasileiro.

Deste modo, as barragens a montante existentes no território nacional deverão passar pelo processo de descaracterização. Segundo Massignan e Sánchez (2022), a legislação motivou uma pesquisa dos métodos e técnicas deste termo e seus impactos ambientais, indicando que o assunto é pouco explorado na literatura internacional. O termo é uma exigência da nova legislação brasileira, motivada por acidentes de barragem como os de Mariana e Brumadinho.

Embora a expressão não seja comumente utilizada na engenharia de barragens internacionalmente, havendo pouca orientação técnica e falta de entendimento compartilhado sobre seu significado e termos relacionados como fechamento e descomissionamento, a experiência brasileira em atender a essa legislação pioneira tem o potencial de contribuir significativamente para o avanço do conhecimento e das técnicas de fechamento de barragens de rejeito.

Dessa forma, este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura. Os objetivos são: (1) identificar e sintetizar os métodos de descaracterização de barragens e recuperação ambiental aplicáveis; (2) analisar os resultados de estudos sobre o reaproveitamento de rejeitos de cassiterita em argamassas e concretos; e (3) avaliar criticamente a sustentabilidade da abordagem, integrando as dimensões de desempenho técnico e segurança ambiental.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Uma das principais regiões minerais do Brasil é a província estanífera de Rondônia (PER), que se destaca na produção de estanho a partir de depósitos primários e secundários associados a rochas graníticas originadas do período Proterozóico (entre 2,5 bilhões e 541 milhões de anos atrás) (Santos *et al*., 2000). Desde a década de 1950, sua exploração tem impulsionado o desenvolvimento econômico da região Norte, especialmente em Rondônia, por meio de projetos como o da Mineradora Taboca em Pitinga (AM) e as atividades no distrito mineiro de Ariquemes (DNPM, 2009).

De acordo com Lima (2019), a obtenção do estanho se dá através de processos metalúrgicos a partir da redução da cassiterita com carvão vegetal ou mineral em temperaturas entre 1100 e 1300 °C. O metal, considerado crítico, possui aplicações tecnológicas em setores industriais diversos, incluindo soldas para componentes eletrônicos, ligas metálicas e revestimentos, o que reforça a importância estratégica da província. No entanto, desafios socioambientais, como o desmatamento e a contaminação de corpos hídricos devido à mineração informal, exigem políticas públicas que promovam práticas sustentáveis (Silva *et al*., 2022).

Segundo Nogueira (2016), o estanho é um metal de fácil trabalhabilidade, possuindo maleabilidade e pouca ductibilidade, sendo não tóxico e resistente à corrosão de agentes naturais, como água e ar, além de apresentar temperatura de fusão relativamente baixa (232 °C). Cita-se sua presença e aplicação na produção de soldas, fusíveis, resistências elétricas, elementos de pequenos aparelhos tecnológicos e componente de produtos químicos, como fungicidas e preservantes de madeira.

Peres (2020) destaca que a exploração da cassiterita em Ariquemes (RO) resultou na significativa geração de rejeitos, particularmente o aluvião estanífero. Rosário (2018) define rejeito como um material que é descartado após a exaustão de todas as possibilidades de reaproveitamento ou reciclagem, não possuindo solução final para o resíduo, e que dessa forma, acabam sendo destinados para barragens de contenção de rejeitos.

Massignan e Sánchez (2022) manifestam que as barragens de mineração são construções projetadas para armazenar os resíduos provenientes da extração de minérios, sendo fundamentais para evitar a contaminação do meio ambiente por metais pesados. Além disso, também possibilitam a reutilização da água, que pode ser usada novamente no processo de mineração, colaborando com a sustentabilidade e a redução do consumo de recursos hídricos.

De acordo com Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), alimentado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), existem 30 (trinta) barragens sob responsabilidade da ANM em Rondônia registradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), dentre estas, 4 (quatro) estão caracterizadas como alta na Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA), onde 2 (duas) foram executadas a montante.

A fim de cumprir o art. 7° da Lei n° 12.334/2010, que visa classificar as barragens por categoria de risco (CRI), dano potencial associado (DPA) e volume, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) através da Resolução CNRH n° 241/2024, definiu um método de classificação baseado em um sistema de pontos, que avalia as características técnicas da estrutura. A partir da soma das pontuações é possível identificar a CRI que é determinada pelas características construtivas e de conservação da barragem e o DPA indica quanto estrago da barragem pode causar se vier a romper.

Conforme Massignan e Sánchez (2022), a descaracterização de barragens de rejeitos de mineração tem como objetivo principal reduzir riscos para as comunidades e o meio ambiente. O processo visa remover a característica de estrutura de armazenamento de rejeitos e alcançar a estabilização física e química da área para sua integração ambiental

De acordo com Nurtjahya *et al*. (2009), a revegetação consiste no processo de restabelecimento da cobertura vegetal em áreas onde esta foi removida ou degradada. O autor aborda especificamente a revegetação de rejeitos de areia de estanho na Ilha de Bangka, Indonésia, utilizando quatro espécies nativas que demonstraram as maiores taxas de sobrevivência e desenvolvimento nos primeiros doze meses, sendo consideradas as mais promissoras para programas de revegetação.

Muitos estudos vêm sendo desenvolvidos para analisar o desempenho do concreto com agregados reciclados. A areia de rejeito de minério, proveniente de exploração de garimpo, possui propriedades que se mostraram compatíveis com a matriz cimentícia, variando os resultados de acordo com as porcentagens substituídas na mistura da pasta (Rocha, 2022). Além de se utilizar esse material na produção do concreto, também pode-se empregar em argamassa de revestimento, pois estudos mostram uma possível viabilidade econômica (Guedes, 2020).

3. MÉTODOS

A barragem selecionada contextualiza a pesquisa, sem caracterizar um estudo de caso aplicado. A barragem de rejeitos de cassiterita do garimpo Bom Futuro em Rondônia, uma estrutura construída pelo método de alteamento a montante que, sob a nova legislação, requer descaracterização. O foco metodológico do artigo, no entanto, recai integralmente sobre a revisão sistemática.

Foi conduzida uma revisão bibliográfica sistemática rigorosa, com o objetivo de identificar, analisar e sintetizar os principais estudos relacionados ao tema. As buscas foram realizadas em bases digitais e repositórios especializados, como Scopus, Web of Science, SciELO e Google Scholar, utilizando palavras-chave: "descaracterização", que levou à identificação de oito artigos que abordam diferentes métodos de descaracterização de barragens; "barragem a montante", que resultou no encontro de dois documentos descrevendo o processo construtivo por esse método, além das razões pelas quais ele tem sido progressivamente proibido; "rejeito de cassiterita", "reaproveitamento" e "recuperação ambiental", que permitiram encontrar dois estudos sobre o uso desses rejeitos na construção civil e um em processos de recuperação de áreas degradadas.

Para garantir a relevância e a qualidade dos estudos, foram definidos critérios de elegibilidade explícitos. Foram incluídos artigos de periódicos revisados por pares, artigos de conferências, teses

e dissertações, publicados em português, inglês ou espanhol, sem restrição de data de publicação para capturar a evolução histórica do tema. O foco temático dos estudos selecionados deveria abordar métodos de descaracterização de barragens de rejeitos, técnicas de recuperação ambiental de áreas de barragens, ou o reaproveitamento de rejeitos de mineração — com preferência para cassiterita, mas incluindo outros análogos — como agregado ou adição em matrizes cimentícias. Além disto, foi necessário que os trabalhos apresentassem dados quantitativos ou qualitativos sobre desempenho técnico, como propriedades mecânicas e físicas, ou ambiental, como testes de lixiviação e sucesso de revegetação. Contudo, foram excluídos artigos cujo foco principal não estava alinhado com a questão de pesquisa, como estudos puramente mineralógicos ou econômicos sem detalhamento técnico. Também foram descartados editoriais, cartas ao editor, resenhas de livros, revisões de literatura não sistemáticas, estudos sobre o reaproveitamento de rejeitos em aplicações não cimentícias (como cerâmicas ou geopolímeros) e artigos cujo texto completo não pôde ser acessado após busca exaustiva.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. MÉTODOS DE DESCARACTERIZAÇÃO APLICÁVEIS

A literatura e estudos práticos, descrevem e aplicam metodologias de revegetação e fitorremediação como contribuições centrais para a descaracterização de barragens. Segundo Liao *et al*. (2007), a revegetação tem como objetivo principal o restabelecimento da cobertura vegetal em áreas degradadas, referindo-se à reconstrução do ecossistema e à função ecológica original. Os procedimentos descritos envolvem o preparo da superfície, que inclui a remoção, armazenamento temporário (em pilhas sem compactação) e reaplicação da camada superficial orgânica. Em taludes, pode ser feito o sulcamento manual para criar micro-terraços.

Áreas planas e compactadas podem receber subsolagem para descompactação (Patrício, 2009). A cobertura do rejeito com materiais adequados, ou a cobertura vegetal, é vista como crucial para o controle da erosão (Yan *et al*. 2013). Sistemas multicamadas podem ser empregados para evitar a Drenagem Ácida de Minas (DAM). Estes sistemas podem incluir uma camada de quebra de capilaridade, cuja finalidade é impedir o fluxo ascendente de metais pesados solubilizados e promover um gradiente de umidade.

Materiais como brita calcária ou laterita podem ser usados nesta camada, com a laterita mostrando potencial para aumento da biomassa produzida. Pode haver também uma camada selante (como solo argiloso compactado ou solo compactado com calcário) para impedir a oxidação do material sulfetado. Sobre estas, aplica-se uma camada de cobertura, que serve de substrato para as plantas e busca oferecer condições próximas às de um solo, podendo incluir terra e gramíneas (Labed *et al*., 1996) ou rocha estéril (Merkel *et al*., 2013).

De acordo Souza *et al*., (2011) a fitorremediação é uma técnica biotecnológica que utiliza plantas, associadas ou não a microrganismos do solo, para descontaminar áreas, como aquelas impactadas por metais pesados e metalóides (Karaca *et al*., 2018). Os documentos exploram o potencial das plantas em princípios como a fitoextração, onde as plantas absorvem e acumulam contaminantes, geralmente na parte aérea, e a fitoestabilização, que imobiliza os contaminantes no solo ou nas raízes, reduzindo sua mobilidade e biodisponibilidade.

A fitoestabilização é muitas vezes preferível para evitar a entrada de contaminantes na cadeia alimentar (Karaca *et al*., 2018). Estudos são realizados, por vezes, em ambiente controlado ou em testes de campo, utilizando solos ou rejeitos contaminados. Espécies como a mamona (*Ricinus communis*) foram avaliadas por seu potencial de acumulação de cobre, e a *Baccharis dracunculifolia* por seu potencial em áreas contaminadas por arsênio. Espécies de *Eucalyptus* também foram testadas, mostrando potencial de acúmulo de arsênio nas folhas (Sanchez-Palacios *et al*., 2013). Outras espécies estudadas incluem o milho (*Zea mays*) e o girassol (*Helianthus annuus*), que apresentaram maior acúmulo de biomassa verde e seca em solos contaminados com rejeitos de mineração, o que é considerado essencial para a recuperação de solos contaminados com metais

pesados, pois plantas com alta biomassa tendem a ser mais eficazes na remoção de contaminantes (Pereira *et al*., 2024).

4.2. MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO (REVEGETAÇÃO)

O estudo de Nurtjahya *et al*. (2009), objetivou avaliar dez espécies de árvores nativas da Indonésia quanto à sua adequação e desenvolver protocolos para a rápida restauração de rejeitos de areia de estanho. O processo envolveu o plantio de um total de 3345 mudas em 45 parcelas, avaliando diferentes distâncias de plantio e tratamentos de solo. Os resultados mostraram que a sobrevivência geral de todos os indivíduos em todas as parcelas diminuiu ao longo dos doze meses, caindo de 98,8% aos três meses para 71,8% aos nove e doze meses. Essa mortalidade foi atribuída principalmente à baixa sobrevivência de algumas espécies, incluindo as pioneiras *S. wallichii*, *Macaranga sp.* e *M. paniculatus*, e a espécie não pioneira *Aporosa sp.*

No entanto, quatro espécies nativas se destacaram com as maiores taxas de sobrevivência e o maior desenvolvimento de copa ao final do experimento de doze meses. As espécies com as maiores taxas de sobrevivência foram *Hibiscus tiliaceus* (100%), *Ficus superba* (99,9%), *Calophyllum inophyllum* (99,3%) e *Syzygium grande* (90,2%). Espécies como *S. wallichii, Macaranga sp.*, *M. paniculatus* e *Aporosa sp.* registraram taxas de sobrevivência abaixo de 20%.

As quatro espécies com melhor desempenho em sobrevivência e cobertura de copa (*H. tiliaceus*, *F. superba*, *C. inophyllum* e *S. grande*) parecem possuir melhores adaptações anatômicas, morfológicas e fisiológicas às condições desafiadoras dos rejeitos estéreis de areia de estanho do que as outras seis espécies. A capacidade de tolerar ou evitar o estresse térmico em rejeitos de areia parece ser crucial para a sobrevivência.

4.3. MÉTODOS DE APROVEITAMENTO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE CASSITERITA (ALUVIÃO ESTANÍFERO)

O estudo de Guedes (2020) buscou analisar o comportamento das propriedades mecânicas das argamassas empregando parcialmente o rejeito de cassiterita (RC) como agregado miúdo. Para isso, o autor produziu quatro traços de argamassa com diferentes dosagens, sendo um deles o traço de referência (LR) e os demais com substituição parcial da areia por rejeito de cassiterita (L20, L30 e L50), como mostra a Tabela 1.

Nomenclatura	Cimento	Areia	RC (%)	a/c
LR	1	3	-	0,5
L20	1	3	20	0,5
L30	1	3	30	0,5
L50	1	3	50	0,5

Tabela 1: Nomenclatura e dosagens das argamassas.
Fonte: Guedes (2020), adaptado pelos autores.

Dentre os materiais utilizados, citam-se as suas seguintes características: cimento Portland CP II 32 Z; areia média com Dimensão Máxima Característica de 4,75 mm e Módulo de Finura de 2,96; e rejeito de cassiterita, proveniente do Garimpo de Bom Futuro e caracterizada por Peres (2020), que apresentou Dimensão Máxima Característica de 2,36 mm, Módulo de Finura de 2,50 e Massa Específica de 2,93 g/cm³. Os resultados dos ensaios realizados são expostos na Tabela 2.

Traço	Índice de consistência (mm)	Densidade de massa (g/cm³)	Absorção de água por imersão (%)	Resistência à tração na flexão (MPa)			Resistência à compressão (MPa)		
				07 dias	14 dias	21 dias	07 dias	14 dias	21 dias
LR	198	2,14	10,22	10,96	11,42	12,11	34,92	33,76	40,54
L20	165	2,16	10,56	9,35	11,01	11,11	31,28	39,64	42,17
L30	162	2,17	10,41	10,39	12,18	11,34	33,06	43,27	46,29
L50	153	2,19	9,10	8,66	10,42	11,03	28,74	40,24	44,83

Tabela 2: Resultados dos ensaios das argamassas no estado fresco e endurecido.
Fonte: Guedes (2020), adaptado pelos autores.

Em continuidade, a pesquisa de Rocha (2022), tinha como objetivo analisar a resistência mecânica da mistura de agregado miúdo com o rejeito de cassiterita no uso de pavers de concreto sextavado para ser utilizado para tráfego leves. Foram executados três traços de concreto, Traço A (Referência) com 100% areia natural, Traço B com 50% areia natural e 50% de areia de rejeito e Traço C com 25% de areia natural e 75% de areia de rejeito. No total foram produzidos 36 moldes nas proporções dos traços definidos e após a cura foram submetidos a testes de resistência à compressão simples e absorção de água. A dosagem foi realizada com relação a/c de 0,44 e traço 1:1:2 e seguindo a padronização da NBR 7212, conforme apresentado na Tabela 3.

Nomenclatura	Cimento (Kg)	Areia Natural (Kg)	Areia de Rejeito (Kg)	Brita (Kg)	Água (L)
Traço A	17,37	17,37	-	34,74	7,65
Traço B	17,37	8,68	8,68	34,74	7,65
Traço C	17,37	4,35	13,03	34,74	7,65

Tabela 3: Nomenclatura e dosagens dos concretos.
Fonte: Rocha (2022), adaptado pelos autores.

Para cada dosagem foi realizado o ensaio de Slump Teste, absorção de água e foram produzidos 3 corpos de prova para cada idade, sendo elas de 7, 14 e 28 dias, para realização do ensaio à compressão simples. Os resultados são demonstrados na Tabela 4.

Traço	Abatimento (mm)	Absorção de água por imersão (%)	Resistência à compressão (MPa)		
			07 dias	14 dias	21 dias
A	15	2,88	59,70	65,57	74,25
B	10	2,30	66,86	74,78	78,55
C	20	2,85	62,85	70,17	57,47

Tabela 4: Resultados dos ensaios do concreto no estado fresco e endurecido.
Fonte: Rocha (2022), adaptado pelos autores.

4.4. DISCUSSÕES

Considerando os resultados do estudo de Nurtjahya *et al*. (2009) obtidos com espécies nativas da Indonésia, como *H. tiliaceus*, *F. superba*, *C. inophyllum* e *S. grande*, que se mostraram promissoras para a revegetação de áreas de mineração de estanho, este estudo ressalta a importância de selecionar espécies com adaptações específicas às condições locais. A capacidade dessas plantas de prosperar em formações como a floresta costeira mista de Barringtonia e a vegetação de Padang, aliada à sua baixa demanda hídrica e evapotranspiração mínima, demonstra ser um fator crucial para o sucesso da revegetação em rejeitos arenosos de estanho. Diante disso, propõe-se a realização de estudos adicionais explorando o potencial de espécies nativas da Amazônia para a

revegetação de áreas degradadas pela mineração, visando identificar plantas com características semelhantes de adaptação e resiliência às condições ambientais locais.

Os traços com teores de RC da pesquisa de Guedes (2020) apresentaram uma contínua diminuição do índice de consistência devido ao aumento da presença de grãos finos, gerando uma menor trabalhabilidade da argamassa. Na análise de densidade, os traços com a presença de RC apresentaram desempenhos similares, sendo o traço de referência superior. Com relação a absorção de água por imersão, o traço L50 demonstrou melhor resultado se comparado ao traço LR.

As argamassas com RC não demonstraram valores relevantes no que se refere a resistência à tração na flexão, ficando estas abaixo dos valores de referência. Porém, ao comparar os resultados de resistência à compressão aos 28 dias, os traços com RC apresentaram notável aumento da resistência, demonstrando que há vantagens na substituição parcial da areia natural pelo agregado de rejeito de cassiterita.

O ensaio de abatimento do estudo de Rocha (2022) trouxe todas as amostras enquadradas na classe S10, que nos mostra um concreto de baixa trabalhabilidade, ótimo para aplicações específicas que exigem alta compactação e baixa fluidez, o que se encaixa nas características necessárias para a produção de pavers e outros elementos pré-moldados. O traço B, que traz 50% de areia de rejeito apresentou com 7 dias uma resistência maior que o traço de referência e manteve o crescente aumento até os 28 dias chegando a 78,55 MPa.

Embora o traço C tenha apresentado uma queda de 3,38% entre os 7 e 28 dias, o seu resultado ainda é satisfatório, pois atingiu uma resistência acima de 35 MPa. No ensaio de absorção de água, observou-se que os traços não tiveram grandes diferenças do traço de referência, trazendo novamente o traço B com um melhor resultado, com uma absorção de 2,30%.

5. CONCLUSÕES

Diante das evidências apresentadas pelos estudos analisados, é possível afirmar que os rejeitos provenientes da atividade mineradora, longe de representarem apenas um passivo ambiental, configuram-se como uma oportunidade estratégica para a engenharia civil. O reaproveitamento desse material em obras de diversos segmentos contribui significativamente para a redução da extração de recursos naturais, mitiga os impactos socioambientais associados ao descarte inadequado de resíduos e estimula o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis para o setor da construção. Essa abordagem, além de promover a economia circular, representa uma alternativa viável especialmente em regiões mineradoras, onde os desafios ambientais e as demandas por desenvolvimento coexistem. Portanto, incentivar políticas públicas e investimentos em pesquisa aplicada torna-se essencial para consolidar essa prática como parte integrante de uma engenharia mais consciente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

BRASIL. **Lei n° 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF: Presidência da República, [2020]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 15 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução CNRH n° 241, de 10 de setembro de 2024**. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por dano potencial associado, por volume e por categoria de risco em atendimento ao art. 7 da Lei n° 12.334, de 20 de setembro de 2010. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 2024, n° 204, p. 137, 21 outubro 2024. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-cnrh-n-241-de-10-de-setembro-de-2024-591385656. Acesso em: 15 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB)**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: https://www.snisb.gov.br/portal-snisb/inicio. Acesso em: 1 abr. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Mineração. **Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022**. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 2022, n° 35, p. 69-79, 18 fevereiro 2022. Disponível em: https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-*-381123395. Acesso em: 15 abr. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Mineração. **Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM)**. Agência Nacional de Mineração. Disponível em: https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico. Acesso em: 1 abr. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Perfil da mineração do estanho**. Brasília: MME/DNPM, 2009. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448620/P18_RT27_Perfil_da_Mineraxo_do_Estanho.pdf. Acesso em: 18 maio 2025.

GUEDES, L. K. A. **Análise da substituição parcial do agregado miúdo em argamassas por rejeito de cassiterita**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Faculdade de Educação e Meio Ambiente. Ariquemes, 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de solos do Brasil**: escala 1:250.000. Rio de Janeiro: 2018.

KARACA, O.; CAMESELLE, C.; REDDY, K. R. Mine tailing disposal sites: contamination problems, remedial options and phytocaps for sustainable remediation. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 17, n. 1, p. 205 – 228, 2018.

LABED, V.; ROBÉ, M. C.; BENEITO, A.; MAUREL, J. M.; RICHON, P. Rehabilitation of a uranium-ore processing residues storage site at Le Bouchet, Paris region, France. **Environment International**, v. 22, n. 1, p. 237 – 241, 1996.

LIAO, M.; XIE, X. M. Effect of heavy metals on substrate utilization pattern, biomass, and activity of microbial communities in a reclaimed mining wasteland of red soil area. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 66, n. 2, p. 217-223, 2007.

LIMA, G. M. Estanho: um metal estratégico ontem e hoje. **Química Nova**, v. 42, n. 7, p. 1-10, 2019.

MASSIGNAN, R. S.; SÁNCHEZ, L. E. O que significa descaracterizar barragens de rejeitos de mineração? Uma revisão sistemática da literatura. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 2, p. 225-234, 2022.

MERKEL, G.; LINDER, S. Design, construction and monitoring of the final cover on Wismut´s Truenzig tailings facility. *In:* **Proceedings of the Eighth International Conference on Mine Closure**. Cornualha, 2013.

NOGUEIRA, Eduardo Hansen. **Caracterização mineralógica da cassiterita da província estanífera de Rondônia**. Trabalho de conclusão de curso (Geologia), Universidade Estadual Paulista. Barra Funda, 2016.

NURTJAHYA, E.; SETIADI, D.; GUHARDJA, E.; SETIADI, Y. M. Establishment of four native tree species for potential revegetating of tin-mined land in Bangka Island, Indonesia. *In:* **Proceedings of the third International Conference on Mine Closure.** Perth, 2009.

PATRÍCIO, R. L. **Avaliação de métodos de revegetação de áreas degradadas utilizados na mineração de níquel em Niquelândia Goiás**. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Gestão Ambiental), Universidade Católica de Brasília. Brasília, 2009.

PEREIRA, M. B.; CASTRO, A. S.; TUELHER, L. F.; SILVA, L. J. E.; CRUZ, F. A. F.; DALVI, L. P. Eficiência de acúmulo de biomassa de plantas fitorremediadoras em solos contaminados com rejeitos de mineração. *In:* **XXVIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XXIV Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e XIV Encontro de Iniciação à Docência,** Universidade do Vale do Paraíba, 2024

PERES, G. L. **Caracterização do rejeito de minério de cassiterita do garimpo Bom Futuro em Ariquemes – RO**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil), Faculdade de Educação e Meio Ambiente. Ariquemes, 2020.

ROCHA, C. O. **Fabricação de bloquetes com utilização de areia de rejeito de garimpo de Ariquemes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Faculdade de Educação e Meio Ambiente. Ariquemes, 2022.

ROSÁRIO, E. C. **Potencialidade do rejeito mineral de estanho na amazônia como fonte de elementos terras raras e urânio**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Pará. Ananindeua, 2018.

SANCHEZ-PALACIOS, J. T.; DORONILA, A. I.; BAKER, A. J. M.; WOODROW, I. E. Performance of eucalyptus species on capped arsenic-rich gold mine tailings in the Victorian Goldfields, Australia. *In:* **Proceedings of the 8th International Conference on Mine Closure**. Cornualha, 2013.

SANTOS, R. V. *et al*. Caracterização geológica e potencial metalogenético da Província Estanífera de Rondônia. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 51–64, 2000.

SGB - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Áreas de relevante interesse mineral: reavaliação da província estanífera de Rondônia**. Porto Velho: 2019.

SILVA, L. N. **Impactos ambientais e suas consequências para a saúde pública do Brasil.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas), Centro Universitário Brasileiro. Recife, 2022.

SOUZA, E. R.; FREIRE, M. B. D. S.; DO NASCIMENTO, C. W.; MONTENEGRO, A. A. D. A.; FREIRE, F. J.; MELO, H. F. D. Fitoextração de sais pela Atriplex numulária lindl. sob estresse hídrico em solo salino sódico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n.5, p. 477-483, 2011.

YAN, D.; ZHAO, F.; SUN, O. J. Assessment of vegetation establishment on tailings dam at an iron ore mining site of Suburban Beijing, China, seven years after reclamation with contrasting site treatment methods. **Environmental Management**, v. 52, n. 3, p. 748 – 757, 2013.